

MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FIRMEZA. SENSORES DE ACELERACIÓN. IMPACTADORES.

Diezma Iglesias, B. Marañón, A. Ruiz-Altisent, M. Flores L. Díez, J.
Laboratorio de Propiedades Físicas (LPF). Dpto. Ingeniería Rural. E.T.S.I. Agrónomos.
U.P.M.
Avda. Complutense s/n. 28040 Madrid.
e-mail: bdiezma@iru.etsia.upm.es

Non desctructive methods for firmness determination. Acceleration sensors. Impact device

Impact techniques can be used to evaluate firmness on fruit. Chen and Ruiz-Altisent developed and used a 50,4 g impactor with a 19 mm diameter spherical tip, dropping from different heights onto the fruit. Another impactor device is a semispherical impacting tip attached to the end of a pivoting arm. In both devices a small acelerometer is mounted behind the impacting tip. Prototype lateral impactor on-line sorting system for high-speed firmness sorting of fruits has been developed and tested. Preliminary results shows that is possible its use on-line. The last version of an impact device has new elements that improve the data resolution, the signal-noise ratio and the precision.

Palabras clave: vertical impactor, lateral impactor/ impactador vertical, impactador lateral

1. Introducción

La exigencia de calidad en los productos alimentarios, y concretamente en frutas para consumo en fresco, es una demanda cada vez más generalizada en los mercados desarrollados. El concepto de calidad es amplio, y desde el punto de vista del consumidor no incluye únicamente los requerimientos que exige la normativa (calibre, color, ausencia de daños...), sino que comprende también la satisfacción de sus expectativas en cuanto a características organolépticas: sabor, firmeza/textura, color, aroma...

Los productores y distribuidores de fruta son conscientes de estos cambios y de la necesidad de ofrecer los niveles de calidad exigidos por los consumidores. Para ello son necesarias técnicas que permitan la medida de diferentes cualidades (Ruiz-Altisent, 2000). Entre estas cualidades se encuentra la firmeza; el estudio de esta propiedad no cuantitativa y la determinación de las magnitudes más relacionadas con ella tiene gran interés para la caracterización de la fruta en cuanto a su calidad organoléptica, su estado de madurez y su resistencia a daños mecánicos durante la recolección, manipulación y transporte hasta el consumidor (Barreiro y Ruiz-Altisent, 1996).

1.1. Líneas de trabajo

Durante mucho tiempo diversos grupos de investigación han estudiado profundamente las relaciones existentes entre los parámetros que caracterizan el impacto mecánico y el

estado de firmeza de algunos frutos. La fuerza y la deformación durante un impacto son parámetros difíciles de medir porque se producen rápidamente y los cambios se suceden en unos pocos milisegundos. Básicamente los desarrollos de dispositivos para el estudio del impacto en frutas han seguido dos líneas de trabajo con dos métodos para medir fuerza y aceleración:

- sistemas que usan un transductor de fuerza (como objeto impactado o como objeto impactante) para medir la fuerza durante el impacto, y otro dispositivo, generalmente electroóptico, para medir deformación; cuando el objeto impactado es una superficie rígida en la que se encuentra el elemento sensor, el fruto se deja caer desde una altura determinada sobre dicha superficie,
- sistemas en los que un cuerpo de masa conocida golpea la fruta en un punto prefijado; un acelerómetro montado en el objeto impactante mide la aceleración negativa durante el tiempo del impacto; la fuerza aplicada en cada instante puede obtenerse como el producto de la masa por la aceleración; integrando dos veces la curva aceleración vs. tiempo se puede obtener la historia de la deformación.

Los resultados de los estudios con diferentes especies y variedades de fruta han mostrado que las técnicas en las que los frutos impactan contra un sensor de fuerza y miden la fuerza en función del tiempo son más susceptibles a los cambios de peso y de radio de curvatura de los frutos, hasta el punto de obtener un enmascaramiento de los datos referidos a la firmeza debido a que la fuerza de impacto es función de la masa y del radio de curvatura, la velocidad está limitada por la velocidad del fruto en caída libre y el punto de impacto no se puede controlar. Algunas aplicaciones han evitado estos inconvenientes, así Moltó y colaboradores (1999) desarrollaron una máquina para la detección de mandarinas “bufadas” (huecas), consistente en una cinta que deja caer las mandarinas desde 3 cm de altura sobre una célula de carga. Para que la regla de decisión fuera independiente del tamaño de la fruta se introdujo un parámetro que ponderaba el tiempo que se tarda en alcanzar la máxima fuerza frente a dicha fuerza máxima.

2. Materiales y métodos: sensores de aceleración. Impactadores

En este artículo nos referiremos a los sistemas que incorporan acelerómetros como elementos sensores. Concretamente, se describirá dos dispositivos impactadores para la determinación de firmeza en fruta: impactador vertical o de caída libre e impactador lateral. Ambos dispositivos han sido diseñados, desarrollados y mejorados en sucesivas versiones en el LPF, sobre la base de un primer prototipo (Chen, Tang, and Chen 1985)

2.1. Impactador vertical o de caída libre

El cuerpo impactante está formado por un vástago cilíndrico en cuyo extremo puede acoplarse una cabeza semiesférica, esto permite modificar la masa del cuerpo impactante así como el diámetro de la semiesfera acoplando diferentes cabezas. Después de llevar a cabo diversos experimentos para determinar la masa y el diámetro óptimos del cuerpo impactante, se utiliza habitualmente una cabeza metálica semiesférica con un diámetro de 19 mm y con una masa tal que hace que vástago y cabeza tengan un peso de 50,4 g; para frutas de mayor masa y dureza de piel, como el

melón, resulta adecuado aumentar a más de 100g. Un pequeño acelerómetro está unido al vástago. En un soporte vertical se encuentra montado un electroimán que actúa como elemento disparador para permitir la caída del cuerpo impactante en el momento preciso. La altura de caída de la cabeza semiesférica es regulable y el fruto se coloca en un soporte cóncavo en el que se puede orientar fácilmente para conseguir que el punto de impacto sea el adecuado en cada ensayo (Foto 1).



Foto 1: Detalle del impactador de caída libre, o vertical

Cuando la masa impactante entra en contacto con la muestra la señal del acelerómetro es enviada a la tarjeta digitalizadora a través de un adaptador y amplificador de señal externo. Los datos almacenados son transferidos a un ordenador, donde un programa se encarga de analizar la señal, extraer los parámetros característicos del impacto y almacenarlos en los archivos correspondientes. El usuario controla el conjunto a través del software desarrollado a tal efecto, el cual permite modificar las condiciones de trabajo. El tiempo de ensayo es de 15-20 segundos, incluida la colocación de la fruta y la realización del impacto.

La masa impactante es un parámetro importante que afecta a la señal recogida y a los posibles daños en la fruta. Estudios realizados por Chen et al. (Chen, Ruiz-Altisent, and Barreiro) concluyen que la disminución de la masa del cuerpo impactante (de 50 a 10 g) y aumento de la velocidad de impacto supone mayores diferencias en los valores de pico de aceleración entre frutos duros y frutos blandos, y una disminución de los daños producidos en el producto. Sin embargo, hay que optar por una solución de equilibrio al elegir la masa del cuerpo impactante, puesto que se debe considerar otros factores: la masa del acelerómetro es al menos de 2 g, la masa del cuerpo impactante ha de ser notablemente mayor; la velocidad del impacto ha de mantenerse constante en todos los impactos, cosa que se hace más difícil al disminuir la masa del cuerpo impactante.

2.2. Impactador lateral

En el impactador lateral, patente solicitada, la masa impactante es un cuerpo semiesférico unido por el centro de percusión a un brazo pivotante, un pequeño acelerómetro montado en la parte posterior de la semiesfera registra las aceleraciones de signo negativo que se producen en el impacto. El impacto se produce cuando gira el brazo pivotante y la semiesfera alcanza la muestra. El impactador lateral está constituido por el sensor (acelerómetro) y los elementos que lo sustentan y permiten su movimiento. Estos elementos son un conjunto de piezas elaboradas en aluminio y metacrilato, que aseguran su estabilidad, además de un electroimán que retiene y libera

el brazo impactante según nos interese, dos rodamientos y un pequeño muelle. La señal es recogida y analizada de la misma manera que en el dispositivo impactador vertical.

Se ha diseñado y desarrollado posteriormente un prototipo de impactador lateral para su uso en líneas de clasificación y manipulación de fruta, consiguiéndose resultados esperanzadores en cuanto a la posibilidad de su uso en líneas comerciales con el fin de segregar la fruta según su estado de firmeza.

Tanto el impactador de caída libre como el impactador lateral miden directamente el tiempo de impacto y la aceleración, que son los utilizados directamente para la determinación de la firmeza.

En los ensayos, según condiciones de trabajo, están determinadas: la masa del cuerpo impactante, la altura de caída y/o la velocidad de impacto de la masa impactante. Como la aceleración y la duración del impacto se miden con el acelerómetro, es posible extraer fácilmente algunos parámetros del impacto: velocidad inicial, velocidad final, fuerza máxima, deformación máxima, deformación permanente, energía aportada, energía absorbida y energía devuelta. En la práctica los parámetros más usados para la determinación de firmeza por medio de impactos de baja energía, han sido la aceleración máxima y el tiempo de impacto.

El tiempo requerido para un ensayo manual utilizando el impactador lateral es de 25-30 segundos. La velocidad de trabajo del impactador lateral instalado en línea puede llegar a 8 frutos/segundo.

2.3. Características del Impactador

En el LPF se ha venido utilizando prototipos de impactador vertical y lateral con diversas especies y variedades de fruta, a lo largo de este tiempo la experiencia adquirida y los avances en programación y adquisición de datos han permitido el desarrollo de un programa que facilita la tarea del ensayo. Así pues, además de los sensores y los elementos que permiten su movimiento o van asociados a él, se encuentran todos aquéllos que se encargan de la adquisición de la señal desde el acelerómetro y su posterior procesado. Estos elementos son:

- amplificador externo que adapta y amplifica la señal para obtener mayor rango dinámico y linealidad,
- tarjeta de adquisición de datos de 12 bits y hasta 40 kHz de frecuencia de muestreo, con un rango de voltaje de 10 V a -10 V, lo que nos permite que el salto de aceleración entre dos niveles consecutivos sea de 0.0625 g,
- programa para Windows 95/98/NT que permite controlar las variables de ensayo, almacenar las medidas hechas y extraer los parámetros de impacto.

3. Resultados: comparación con instrumentos de referencia

Para la utilización de un impactador como instrumento para la determinación no destructiva de la firmeza, y en general para el desarrollo e implantación de cualquier nuevo método, en la práctica se precisa de una comparación con los métodos

tradicionalmente empleados en el sector. En lo que se refiere a medidas instrumentales que den una idea del estado de firmeza de las frutas, el ensayo de penetración Magness-Taylor ha sido y es una práctica ampliamente utilizada; es un método destructivo a través del cual se establece la fuerza de penetración (N, kgf o kg/cm^2) necesaria para introducir un vástago cilíndrico de base semiesférica de 8 u 11 mm de \varnothing en la pulpa después de quitar la piel hasta una determinada profundidad a una velocidad de 20 mm/min; por ello es de utilidad estudiar la relación entre los parámetros de impacto y los del ensayo de penetración Magness-Taylor, a pesar de que este ensayo tiene una repetibilidad muy baja. Es más repetible el uso del cociente *fuerza máxima/deformación en fuerza máxima*.

Por todo lo anterior, para la comparación de estos dos sistemas de firmeza se ha empleado el coeficiente de correlación entre el ratio fuerza/deformación determinado por impacto y el mismo ratio determinado por penetración Magness-Taylor (usando una máquina universal de ensayos ó texturómetro) para varias especies de frutas (albaricoques, melocotones, manzanas, peras) con diferentes estados de firmeza. En el gráfico siguiente podemos ver que la relación existente entre ambos ratios es una relación exponencial. En la primera parte de la curva (cuando los frutos están más blandos) el ensayo de impactos controlados es más segregante que el ensayo de penetración Magness-Taylor; esto es, para valores del ratio fuerza/deformación bajos el ensayo de impacto es capaz de diferenciar varios niveles de firmeza, mientras que el ensayo de penetración Magness-Taylor no. Si se hace un ajuste logarítmico para relacionar ambas variables, el valor de la correlación es de $r=0.92386$ ($r^2=0.8535$). Este resultado muestra que la Fuerza/deformación Impacto es un parámetro obtenido de forma no destructiva y rápida, que podría sustituir al ensayo destructivo Magness-Taylor en la determinación de la firmeza en laboratorio y líneas de manipulación.

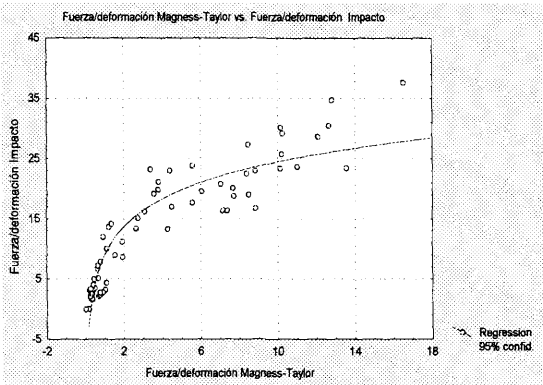


Tabla 1: Fuerza/deformación Magness-Taylor vs. Fuerza/deformación Impacto

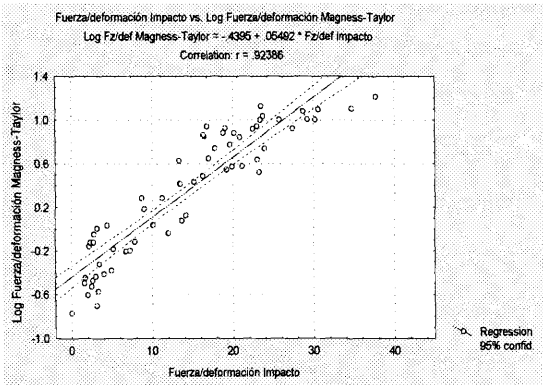


Tabla 2: Fuerza/deformación Impacto vs. Log Fuerza/deformación Magness-Taylor

4. Conclusiones

La aplicación de nuevas tecnologías a la determinación de los parámetros físicos relacionados con la calidad, puede contribuir en gran medida a mejorar ésta, satisfaciendo por otra parte la exigencia demandada por los diferentes mercados de clientes. Para la determinación de la variable firmeza/textura tan intrínsecamente

relacionada con la calidad final del producto, se plantea la utilización de sensores de aceleración (acelerómetros), llamados “impactadores”, bien en caída libre, bien en impacto lateral. Para estos últimos se han desarrollado prototipos que permiten su utilización en líneas de manipulación con el objetivo de diferenciar en grupos de firmeza.

La comparación con el procedimiento de estimación de firmeza tipo Magness- Taylor, ampliamente reconocido, muestra un mejor poder segregante para frutos más blandos en gráficas de fuerza/deformación Magness-Taylor vs. fuerza/deformación Impacto y una correlación de $r=0.92386$ en gráficas de Fuerza/deformación Impacto vs. Log fuerza/deformación Magness-Taylor. Ambos resultados muestran que la fuerza/deformación impacto es un parámetro obtenido de forma rápida y no destructiva, que puede jugar un papel muy importante como medida instrumental de la firmeza, no destructiva y con ventajas sobre el tradicional ensayo de penetración.

5. Referencias bibliográficas

1. Barreiro, P. 1994. Tesis Doctoral: Modelos para la simulación de daños mecánicos, y desarrollo de un algoritmo de evaluación de maquinaria para los principales cultivos de albaricoque, manzana, melocotón y pera. U.P.M. Madrid
2. Barreiro, P., Ruiz-Altisent M. Abril, 1996. Propiedades mecánicas y calidad de frutos. Definiciones y medidas instrumentales. Fruticultura Profesional vol. 77
3. Chen, P., Ruiz-Altisent M., Barreiro P. 1996. Effects of impacting mass on firmness sensing of fruits. Transactions of the ASAE 39(3):1019-1023
4. Chen, P., Tang, S., Chen, S. 1985. Instrument for testing the response of fruits to impact. Paper of ASAE 1985. 85-3537
5. Delwiche, M.J., Sarig, Y. 1989. A probe impact sensor for fruit texture measurement. Presentado a American Society of Agricultural Engineers. New Orleans, 89-6609
6. Gutiérrez, A., Ramos, P., Moltó, E. Abril, 1999. Desarrollo de una máquina para la detección de mandarinas bufadas basada en sensores de firmeza. Actas de Horticultura 27. Comunicaciones VIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas vol. 4, 67-71.
7. Ruiz Altisent, M., Valero, C. Mayo, 2000. La calidad de la fruta. Vida Rural, 66-68.
8. García, F. 2000. Tesis Doctoral: Calidad de los procesos post-recolección y equipos de manipulación de fruta de hueso y cítricos, con referencia a daños mecánicos. Modelos de predicción de daños. U.P.M. Madrid.
9. García, F.J. 2000. Tesis Doctoral: Desarrollo de dispositivos mecánicos para minimizar daños y medir la firmeza en líneas de manipulación de frutas. U.P.M. Madrid.